

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/14

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Tomáš Kroutil

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Konstrukce adaptivního zrcadla pro výkonové laserové aplikace**

v anglickém jazyce:

### **Design of adaptive mirror for high power laser applications**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh optického prvku, umožňujícího plynulou změnu rozložení energie v laserovém svazku. Jedná se o návrh technického řešení zrcadla s proměnným tvarem povrchu, ovládaným sadou tahových elementů se závitem.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Návrh konstrukčních řešení
5. Výsledné konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data

Typ práce: konstrukční; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2014.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf)

Šablona práce: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK\\_sablona\\_praci.zip](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip)

Seznam odborné literatury:


Laser-assisted fabrication of materials. New York, 2012, Springer, ISBN 978-364-2283-581.

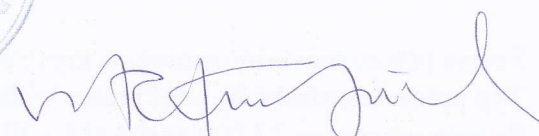
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 20.11.2013



U.2.   
prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

### **ABSTRAKT**

---

Bakalářská práce se zabývá návrhem a výrobou prototypu adaptivního zrcadla pro výkonové lasery. Deformace zrcadla je vytvořena sadou tahových elementů a tlakem vzduchu. Velikost deformace odrazné plochy je v řádu desetin milimetrů. Rešeršní část je věnována laserové technologii s adaptivní optikou. Konstrukční část obsahuje různé varianty řešení a optimální řešení, které bylo zvoleno pro realizaci. Skutečná deformace odrazné plochy zrcadla byla vyhodnocena 3D skenerem.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

---

Laser, adaptivní optika, 3D skener

### **ABSTRAKT**

---

Bachelor thesis deals with design and production of the prototype of adaptive mirror for high power lasers. Deformation of mirror is possible by a set of tensile elements and air pressure. The deformation of reflective surface is in tenths of millimeters. The research part is devoted to laser technology with adaptive optics. The design part contains several design variants and optimal solution, which was chosen for realization. Real deformation of reflective surface was evaluated by 3D scanner.

### **KEYWORDS**

---

Laser, adaptive optics, 3D scanner

### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

---

KROUTIL, T. *Konstrukce adaptivního zrcadla pro výkonové laserové aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

---

---

---

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Daniela Koutného, Ph.D a za připomínek doc. RNDr. Libora Mrňi, Ph.D. a uvedl v seznamu všechny použité literární zdroje.

V Brně dne.....

.....  
Podpis

---

---

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Danieli Koutnému, Ph.D. za vedení mé práce, cenné rady a připomínky. Dále doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za odborné rady a poskytnuté materiály a také Doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za pomoc při měření.

---

**OBSAH**

---

<b>OBSAH</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>13</b>
1.1 Laserová technologie	13
1.2 Adaptivní optika	14
1.2.1 Adaptivní optika v astronomii	14
1.2.2 Aktivní optika	14
1.2.3 Kapalinová deformovatelná zrcadla	14
1.3 Současný stav vývoje adaptivních zrcadel	15
<b>2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>18</b>
<b>3 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ</b>	<b>19</b>
3.1 Tahové elementy	20
3.1.1 Táhllo	20
3.1.2 Pneumatický válec	21
3.1.3 Elektromagnet	21
3.1.4 Motorizovaný aktuátor	22
3.1.5 Lineární piezoaktuátor	22
3.2 Rozmístění bloků v dutině zrcadla	23
3.2.1 Varianta rozmístění bloků do mřížky se spárou ve středu	24
3.2.2 Varianta rozmístění bloků do mřížky s blokem ve středu	25
3.2.3 Varianta rozmístění bloků do šestiúhelníků	26
3.2.4 Varianta rozmístění bloků do kruhů	27
3.3 Výběr optimální varianty řešení	28
<b>4 VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>29</b>
4.1 Zrcadlo	30
4.2 Dolní příruba	31
4.3 Horní příruba	32
4.4 Přítlačný plech	33
4.5 Táhllo	33
4.6 Průchozí šrouby	33
4.7 Ostatní díly	34
<b>5 MĚŘENÍ POVRCHU ZRCADLA 3D SKENEREM</b>	<b>36</b>
5.1 Podmínky měření	37
5.2 Utažená středová táhllo	38
5.3 Utažená středová i obvodová táhllo	39
5.4 Maximální vhodné utažení táhel	40
5.5 Další metody měření deformace zrcadla	41
5.5.1 Zobrazení odraženého laserového svazku na stínítku	41
5.5.2 Měření Michelsonovým interferometrem	42
<b>6 DISKUZE</b>	<b>43</b>
<b>7 ZÁVĚR</b>	<b>44</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>45</b>
<b>9 SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>47</b>
<b>10 SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>48</b>
10.1 Výkresová dokumentace	48



---

## ÚVOD

Cílem této práce je návrh a konstrukce prototypu sestavy adaptivního zrcadla pro výkonové lasery. Schopnost této sestavy bude deformovat odraznou plochu zrcadla do obecného tvaru. Tato deformace bude v řádech desetin milimetrů, což je u zrcadel tohoto typu neobvykle velká hodnota. Změnou tvaru odrazné plochy bude možné měnit rozložení hustoty energie a geometrii odraženého laserového svazku, čehož lze využít při mnoha průmyslových aplikacích, především pro řezání a svařování materiálů. Deformace plochy bude zajištěna tlakem vzduchu a sadou tahových elementů připevněných na zadní straně zrcadla.

Práce je rozdělena na dvě části. První část má formu rešerše a zabývá se teoretickým úvodem do laserové techniky a adaptivní optiky. Dále je nastíněn současný stav vývoje adaptivních zrcadel, ve kterém jsou popsána některá již vyrobená adaptivní zrcadla.

Další část práce je věnovaná samotnému konstrukčnímu návrhu adaptivního zrcadla. Je zde popsáno několik různých variant, které jsou z hlediska požadovaných vlastností zhodnoceny. Následně je zvoleno optimální řešení pro realizaci konstrukčního návrhu, které je detailně popsáno. Dále je 3D skenerem provedeno několik snímků odrazné plochy vyrobené sestavy adaptivního zrcadla a je změřena deformace této plochy. Následuje diskuze, ve které je zvolené řešení zhodnoceno a závěr.

## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

---

**1**

### 1.1 Laserová technologie

První teoretické základy nucené emise záření popsal Albert Einstein už v roce 1917, ale až roku 1958 C.H. Towns a A. L. Shawlow navrhli projekt laseru a o dva roky později T. H. Maiman zkonstruoval rubínový laser. Progresivní rozvoj laserů byl zaznamenán od roku 1971.

Laser je zdroj optického záření, který využívá stimulovanou emisi pro generování zesíleného záření, jež vzniká potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise v prostředí určitého elektromagnetického záření. Důležitou vlastností světelného paprsku laseru je jeho malá divergence. Jeho tvar je dán geometrickou konstrukcí rezonátoru a nastavením zrcadel. V příčném řezu může paprsek tvořit buď jednoduchou stopu, nebo obrazce složitějších tvarů, které mohou být pravoúhle nebo kruhově symetrické. Tato vlastnost se nazývá módová struktura a určuje hustotu energie a vhodnost pro typ průmyslové aplikace. Paprsek v základním módu má Gaussovo rozložení. Díky všem těmto vlastnostem je možné dosáhnout vysoké fokusace paprsku, jenž dokáže vyvinout obrovskou koncentraci energie na velmi malou plochu. Tímto způsobem dochází k natavení až odpaření opracovávaného materiálu. Fokuseovaný paprsek má velmi malý průměr, řádově v desetinách milimetrů a je přímo úměrný vlnové délce laseru, ohniskové vzdálenosti čočky a nepřímo úměrný poloměru původnímu paprsku.

Kvůli širokému spektru použití laseru, jeho vlastností a výkonu se lasery dělí do různých kategorií. Nejčastěji podle aktivního prostředí na pevnolátkové, plynné, kapalinové a polovodičové. Dále pak podle vlnové délky, která se rozlišuje na infračervené, světelné, ultrafialové, rentgenové a gama záření a také podle časově závislého režimu, ve kterém lasery pracují, na kontinuální (cw), pulzní (pw), nebo Q-switched (Qs) režim. Podle dosahovaného výkonu lze lasery rozdělit na nízkovýkonové 0,1 W - 100 W a vysokovýkonové 1 kW - 30 kW. Nejvíce používané lasery v průmyslu, pro zpracování materiálu, jsou pevnolátkové Nd - YAG a plynné CO<sub>2</sub> lasery.

Zpracování laserem splňuje vysoké nároky strojírenské výroby na přesnost, flexibilitu i kvalitu a lze jej snadno zautomatizovat. Laserem se dají obrábět téměř všechny druhy konstrukčních materiálů, bez ohledu na tvrdost, křehkost nebo pevnost. Je možné ho použít i pro zpracování kompozitů, plastů, keramiky, skla, diamantu nebo těžko-obrobitelné oceli. Nejvýznamnější uplatnění laseru je jeho použití v průmyslu pro aplikace typu řezání, gravírování a sváření, dále pak pro vrtání, navařování, tepelné zpracování, povrchové natavování, legování, nanášení povlaků, tvarování, obrábění a mikroobrábění, přípravu kovových soustav v amorfním stavu, leštění a tepelné zpracování povrchů. Nezastupitelnou roli má laser při výrobě elektroniky, v automobilovém průmyslu a lékařství. Další použití laseru jsou nedestruktivní metody zkoušení, měřicí systémy v metrologii, kompaktní disky či laserový skalpel. Laser se uplatňuje v aplikacích, nově vyvinutých na základě požadavků průmyslu, jako jsou růst safírových krystalů, táhnutí optických vláken, barvení, dělení skla a keramiky kontrolovaným lomem, 3D tisk z kovových prášků, soustružení nebo jiné obrábění za pomoci laseru [1, 2, 3, 4].

---

## 1.2 Adaptivní optika

Adaptivní optika je technologie, která umožňuje s vysokou frekvencí ovlivňovat tvar vlnoplochy na základě jejího měření v reálném čase. Princip byl navržen již v 50. letech 20. století, avšak prakticky se dal uskutečnit až o šedesát let později. Největší vývoj probíhá až v posledních 25 letech. Systém adaptivní optiky obsahuje kombinaci senzorů, akčních členů a řídicího systému. Nejčastější aplikací adaptivní optiky jsou adaptivní zrcadla v astronomii, která reagují na atmosférické jevy vhodným zakřivením a upravuje tak zkreslení obrazu. Postupem času se však nachází aplikace i v jiných disciplínách jako využití v oční medicíně, biologické mikroskopii, LIDAR systémech či u korekce svazků výkonových laserů. Tato technologie často posouvá optické systémy o celou vývojovou generaci dopředu [4, 5].

---

### 1.2.1 Adaptivní optika v astronomii

Adaptivní optika je zařízení, které se v astronomii používá ke kompenzaci zhoršení kvality obrazu způsobené průchodem světla turbulentní atmosférou. Často se jedná o systém segmentů zrcadla, u kterého je důležité s vysokou frekvencí reagovat na změnu neklidné atmosféry a tím změnu vlnoplochy přicházejícího světla. Zrcadlo pak přizpůsobí svůj tvar tak, aby vlnoplochu vrátilo do původního tvaru. Tento proces se opakuje přibližně s frekvencí 1 kHz. Většinou se jako adaptivní konstruuje sekundární nebo terciární zrcadlo, výjimečně však i primární. Systém adaptivní optiky se skládá ze tří částí a to čidla, které měří deformaci vlnoplochy, zařízení upravujícího tvar zrcadla a velmi výkonného počítače [6, 7].

---

### 1.2.2 Aktivní optika

Aktivní optika se od adaptivní liší tím, že odstraňuje chyby samotného optického systému, čímž zachovává správný tvar zrcadla. Tyto chyby mohou být způsobené vahou zrcadla, teplotním gradientem či výrobní vadou. Korekce aktivní optiky má daleko nižší frekvenci než adaptivní [8].

---

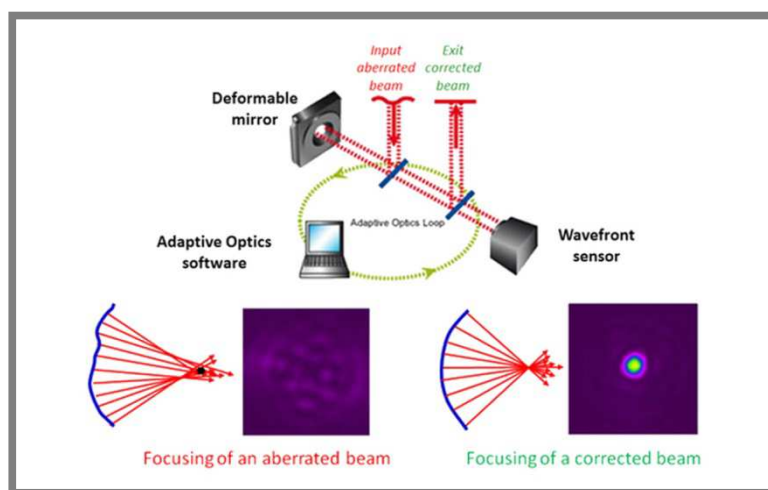
### 1.2.3 Kapalinová deformovatelná zrcadla

První kapalinová zrcadla se stavěla na přelomu 20. a 21. století a byla tvořena rtutí parabolického tvaru dosahovaného pomocí rotace. Největší zrcadlo tohoto typu je součástí dalekohledu a dosahuje průměru 6 m. Nevýhoda těchto zrcadel je jejich absence natáčení, jelikož musí směřovat vždy kolmo k zemi.

Další způsob deformování tekutého zrcadla vyvinuli italští vědci a je založen na průchodu elektrického proudu povrchem zrcadla tvořeným tekutou rtutí a takový povrch je deformovaný pomocí cívek vytvářejících magnetické pole. Nevýhodou této metody však byla vysoká hustota rtuti a tedy nutnost použít vysokých proudů. Jako řešení se ukázalo použití fero kapaliny, což je látka, která je schopná reagovat na magnetické pole [9].

### 1.3 Současný stav vývoje adaptivních zrcadel

V současné době pracuje mnoho výzkumných pracovišť na vývoji adaptivní optiky a to jak na adaptivních zrcadlech určených pro astronomii, tak stále častěji na deformovatelných zrcadlech pro výkonové lasery. Vyvíjená zrcadla pro výkonové lasery jsou však většinou schopna pouze reagovat na deformaci vzniklou tepelným gradientem na povrchu zrcadla a zpětně upravovat tvar povrchu do původního tvaru. K této úpravě se nejčastěji používají systémy MEMS a aktuátory využívající piezoelektrického jevu, které jsou schopny pohybu maximálně v rozmezí 100  $\mu\text{m}$ . Obrázek níže popisuje princip, jakým adaptivní zrcadlo funguje. V následujících odstavcích jsou popsána některá adaptivní zrcadla pro výkonové lasery, která se již podařilo vyrobit.



Obr. 1 Princip adaptivního zrcadla [14]

Ruské vědecké výzkumné centrum pro laserovou technologii vyvinulo adaptivní zrcadlo, které je schopné měnit vlastnosti  $\text{CO}_2$  laserového svazku. Zrcadlo je vyrobeno z mědi a je zevnitř chlazeno vodou. Deformaci zrcadla provádí bimorfnní piezoelementy. Stěna zrcadla má tloušťku 2,5 mm, průměr 100 mm a je rozdělena na 17 segmentů, rozmístěných do kruhů. Zrcadlo je schopno měnit svůj poloměr v rozmezí  $\pm 50 \text{ m}$  [10].

Francouzská laboratoř zabývající se optickými aplikacemi, vyvinula v roce 2002 sférické zrcadlo pro výkonové laserové svazky, které je schopné opravovat drobné odchylky od přesného tvaru. Řízení je prováděno pomocí zpětné vazby z Shack-Hartmannova senzoru. Stěna tohoto zrcadla je vyrobena z bimorfnního materiálu a má 36 piezoelektrických aktuátorů. Maximální velikost deformace, které je zrcadlo schopno provést je  $\pm 40 \mu\text{m}$  [11].

V laboratoři optických aplikací ve Francii se v roce 2005 podařilo vyvinout adaptivní zrcadlo, které dokáže svou bimorfnní parabolickou odraznou plochu deformovat pomocí 36 aktuátorů. Systém pracuje s frekvencí 10 Hz se zpětnou vazbou z Shack-Hartmannova senzoru. Zrcadlo bylo úspěšně testováno na vysokofrekvenčním pulzním laseru s intenzitou energie až  $1,4 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ . Plochu zrcadla je možné deformovat v rozmezí 26  $\mu\text{m}$  [12].

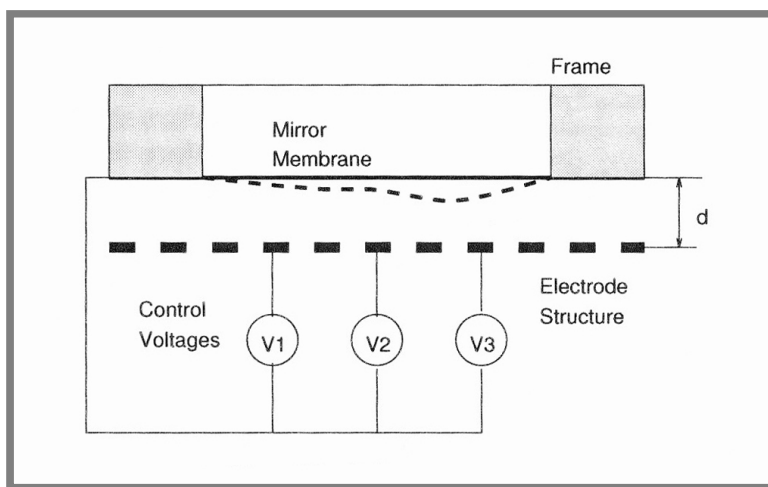
Jedno z dalších adaptivních zrcadel bylo vyvinuto v laboratoři pro adaptivní optiku v Číně v roce 2007. Toto zrcadlo je určeno pro pevnolátkový laser pracující

v kontinuálním režimu a má za účel kompenzovat tepelnou dilataci zrcadla a měnit některé módy laserového svazku. Stěna zrcadla je deformovaná devatenácti piezoelektrickými elementy [13].

Francouzská společnost sídlící v Orsay, vyvinula v roce 2010, za pomoci vědců, deformovatelné zrcadlo pro velmi intenzivní laserové aplikace. Princip tohoto zrcadla spočívá v mechanických aktuátorech, které působí silou na zadní stěnu povrchu zrcadla a tím mění tvar odrazné plochy. Klíčová vlastnost tohoto principu je to, že pokud se aktuátory jednou nastaví do požadované polohy, tak už nadále není potřeba další energie pro udržení aktuátorů v této poloze. Jiné technologie potřebují k udržení tvaru plochy energii ve formě napětí nebo proudu, která kvůli disipaci vytváří teplo a zrcadlo se tak stane tepelně nestabilní. Další rozdíl je v nízké frekvenci změny tvaru zrcadla. Metody, které využívají piezoelektrické aktuátory jsou schopné reagovat s frekvencí několika kilohertzů. Tyto metody se však využívají v astronomické optice, kde musí být optika schopna rychle reagovat na změnu atmosféry. Laserová optika tuto vlastnost mít nemusí a proto je dostačující změna tvaru zrcadla pouze s frekvencí 1 Hz. Zrcadlo, které tato společnost vyvinula má průměr 80 mm a obsahuje 52 aktuátorů. Je vyrobeno z optického skla, pokrytého povlakem a je schopné měnit tvar odrazné plochy ve svém středu o  $\pm 60 \mu\text{m}$  a na okraji o  $\pm 25 \mu\text{m}$  [14].

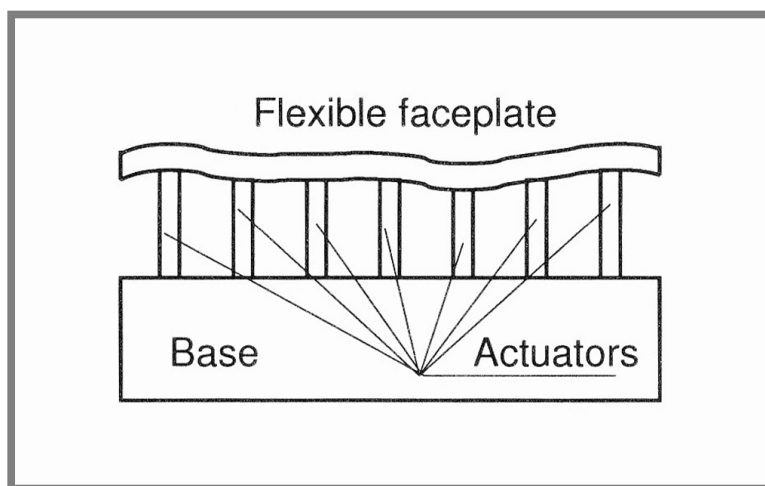
Společnost OKO Technologies vyrábí dva typy deformovatelných zrcadel. První typ, Mikroobráběné Membránové Deformovatelné Zrcadlo (MMDM) a druhý Piezoelektrické Deformovatelné zrcadlo (PDM).

První typ zrcadla má velmi tenkou membránu, tloušťky 0,5 až 10  $\mu\text{m}$  a může být vyrobeno s průměrem 5 až 50 mm. Membrána je deformovaná pomocí sady elektrod, které na membránu působí elektrostatickou silou. Je upevněna na krajích za obvodovou stěnu zrcadla a je možné ji vychylovat oběma směry a vytvářet tak různé tvary plochy. Velikost maximální deformace závisí na průměru membrány a počtu elektrod. V současnosti společnost vyrábí mnoho druhů tohoto typu zrcadel, ale všechny druhy jsou optimalizovány tak, aby bylo dosaženo minimální deformace 1000 až 1300 nm [15].



Obr. 2 Schéma MMDM zrcadla [15]

Zrcadlo druhého typu je tvořeno tenkým pevným plátem, vyrobeným v závislosti na aplikaci ze skla, křemíkového skla nebo křemíku. Plát je povlakovaný odpovídajícím optickým povlakem a nalepený na sadu piezoelektrických aktuátorů, jejichž pohybem se vytvoří deformace plátu. Oproti MMDM zrcadlu má PDM zrcadlo volné okraje a je tedy možné dosáhnout obecnějších tvarů ploch. Společnost vyrábí zrcadla, která jsou schopná v závislosti na tuhosti plátu, deformovat svoji plochu v rozsahu 1 až 3  $\mu\text{m}$  [15].



Obr. 3 Schéma PDM zrcadla [15]

---

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Funkce adaptivního zrcadla bude měnit tvar odrazné plochy a to tak, že se stěna zrcadla zdeformuje do obecného tvaru. Tím se ve výkonovém laseru zajistí změna rozložení hustoty a vlastností odraženého laserového svazku. Aby bylo možné stěnu deformovat, bude na ni nutné působit dostatečně velkou silou, která způsobí vhodné přetvoření. Jelikož je potřeba deformovat plochu v řádu desetin milimetrů, není možné použít MEMS systémy, ani běžné piezoaktuátory, které jsou schopny pouze malých pohybů. Na odvrácenou část odrazné plochy bude působit relativně vysoký tlak od přiváděného vzduchu a z toho důvodu musí být prostor za zrcadlem dostatečně těsný.

Sestava adaptivního zrcadla musí splňovat požadavky, které jsou kladeny na optiku obvyklých průmyslových výkonových laserů. Zrcadlo musí být schopno odolávat vysokým výkonům s hustotou v jednotkách kilowatů na  $\text{cm}^2$ . Rovněž musí odrazet paprsek s co nejmenšími ztrátami a také zůstat funkční i při vyšších teplotách. Kvůli těmto vlastnostem bude polotovar adaptivního zrcadla pevné zrcadlo, využívané v běžných výkonových laserech. Celá sestava musí být natolik kompaktní, aby ji bylo možné umístit do hlavy výkonového laseru.

Cílem práce je provést konstrukční návrh sestavy adaptivního zrcadla, která bude schopná měnit tvar odrazné plochy zrcadla pomocí sady tahových elementů a tlaku vzduchu a zároveň splnit zmíněné požadavky.

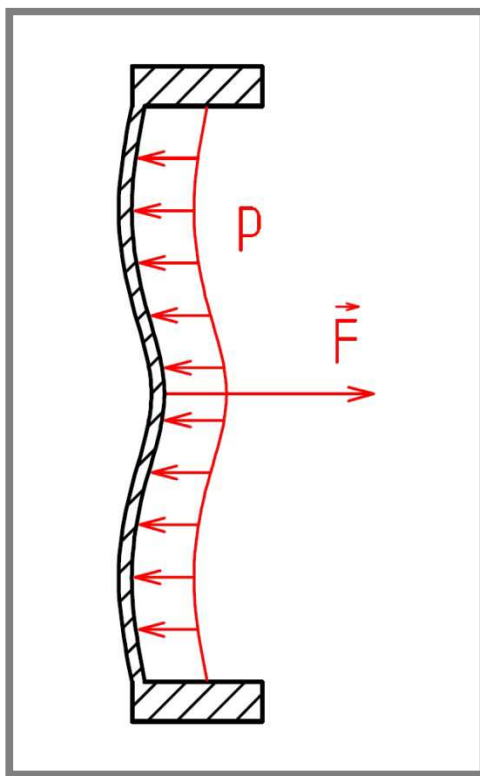
Zkonstruovaná sestava musí splňovat tyto parametry:

- Odrazná plocha musí být schopna se do určité míry deformovat do obecného tvaru v řádech desetin milimetrů.
- Do dutiny za zrcadlem musí být možné přivádět vzduch pod tlakem 5-10 barů, který bude zrcadlo chladit a vyvíjet tlak na stěnu odrazné plochy.
- Dutina sestavy adaptivního zrcadla musí být dostatečně utěsněna, aby nedocházelo k úniku vzduchu.

### 3 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ

**3**

V návrhu je nutné vyřešit způsob deformace odrazné plochy. Tato deformace bude provedena tak, že na vnitřní plochu stěny zrcadla bude působit tlak, který tuto stěnu deformuje směrem ven. Z druhé strany bude nutné působit opačnou silou, která obstará vtahování stěny dutiny zpět. Tímto způsobem se zajistí změna tvaru plochy do obecného tvaru. Jelikož polotovar deformovatelného zrcadla je pevné zrcadlo, které se běžně využívá ve výkonových laserech, je nutné na zadní straně vytvořit dutinu. Tato dutina bude obsahovat několik bloků, pomocí nichž se bude přenášet tahová síla na stěnu odrazné plochy. Je sice možné vytvořit deformaci jen pomocí tažných prvků, ale jelikož bude do dutiny za zrcadlem přiváděn pod tlakem vzduch, využijeme této skutečnosti k deformaci stěny. Princip činnosti je možné vidět na obrázku.



Obr. 4 Princip deformace stěny zrcadla

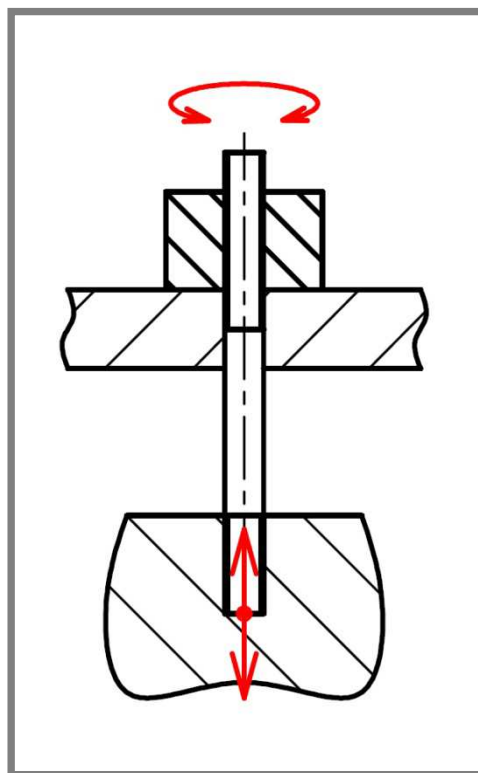


### 3.1 Tahové elementy

K vytvoření síly na stěnu zrcadla, působící směrem od odrazné plochy, bude nutné na stěnu zrcadla působit tahovou silou. K deformaci stěny ve všech místech do obecného tvaru bude nutné použít několik iniciátorů tahové síly. Velikost deformace musí být řádově v desetinách milimetrů a proto je nutné vyvinout dostatečnou sílu, která takto relativně velkou deformaci umožní. Možností jak vyvinout tahovou sílu dostatečné velikosti se nabízí několik.

#### 3.1.1 Táhlo

Deformace stěny zrcadla je možná, pomocí jednoduchého tahového mechanismu. Tento mechanismus obsahuje táhlo, které je na obou koncích opatřeno závity. Dolní závit slouží k pevnému přichycení táhla k zrcadlu a díky hornímu závitu dochází při pootočení našroubovaného dílu k lineárnímu pohybu táhla spolu s částí zrcadla.



Obr. 5 Princip tahového mechanismu

### 3.1.2 Pneumatický válec

3.1.2

---

Pneumatický válec o průměru pouze 10 mm, od společnosti Rexroth Bosch Group, je schopný vyvinout sílu velikosti 41 N a jeho je posuv 40 mm. Ke svému chodu potřebuje tlak 6,3 barů a je schopný pracovat v teplotách až 80 °C. Pneumatický válec se také jeví jako vhodný pro deformaci stěny zrcadla. Avšak přesnost polohování tohoto mechanismu není příliš vysoká. Rovněž by bylo možné využít hydraulického válce, který pracuje na podobném principu [16].



Obr. 6 Pneumatický válec firmy Rexroth Bosch Group [16]

### 3.1.3 Elektromagnet

3.1.3

---

Tento tažný magnet od firmy Intertec Components je schopný působit silou až 17,6 N. Jeho vnější průměr je 19 mm a výška 42 mm. Maximální teplota, při které může být použit je 130 °C. Díky těmto vlastnostem se jeví jako vhodný pro tuto aplikaci. Jeho nevýhodou je velká proudová spotřeba v případě použití více elektromagnetů [17].



Obr. 7 Tažný elektromagnet firmy Intertec Components [17]

---

### 3.1.4 Motorizovaný aktuátor

Nejmenší varianta kompaktního motorizovaného aktuátoru od společnosti Newport, dokáže vyvinout axiální sílu až 60 N. Průměr těla má 15 mm a rozsah pojezdu 6 mm. Pohyb zajišťuje šroub poháněný krokovým motorem nebo servomotorem se zpětnou vazbou pomocí enkodéru. Nejmenší posuv jakého je aktuátor schopný je 0,2  $\mu\text{m}$ . Tento aktuátor by byl velmi vhodný pro vytvoření tahové síly na stěnu zrcadla [18].



Obr. 8 Motorizovaný aktuátor firmy Newport [18]

---

### 3.1.5 Lineární piezoaktuátor

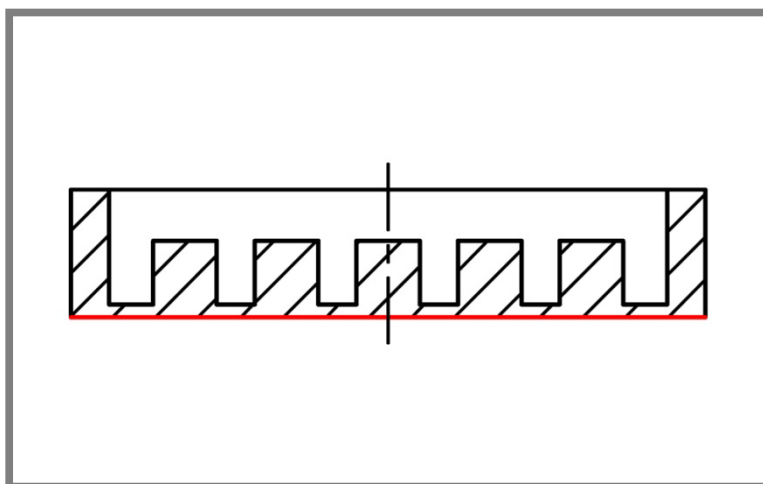
Jedno z nejmenších zařízení tohoto typu od společnosti Newton, je schopno vytvořit maximální sílu 22 N a lineární pohyb v rozsahu 25,4 mm. Rozsah teplot, ve kterém je zařízení schopno pracovat je 10-40 °C. Minimální možný pohyb je 30 nm. Tento typ zařízení by bylo také možné použít k vytvoření deformace stěny zrcadla [19].



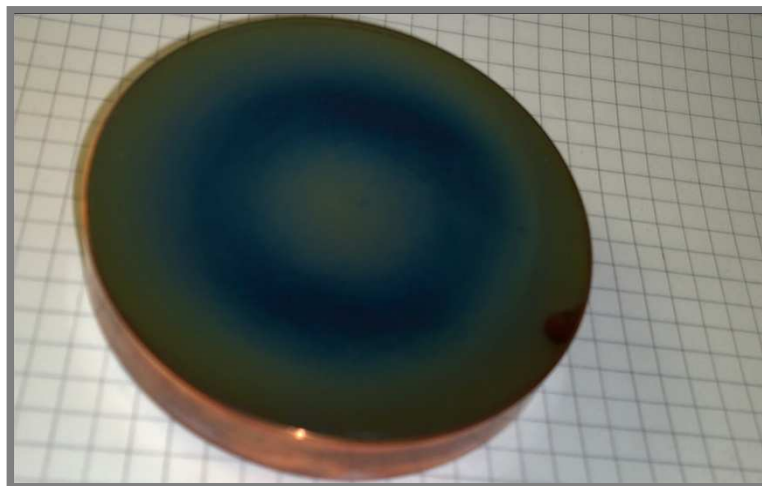
Obr. 9 Lineární piezoaktuátor firmy Newport [19]

### 3.2 Rozmístění bloků v dutině zrcadla

Na zadní stranu zrcadla je nutné působit tahovou silou, která vytvoří deformaci povrchu. Aby bylo možné tahovou sílu přenést na stěnu zrcadla, bude nutné vytvořit v dutině sadu bloků, jimiž se bude tahová síla na stěnu přenášet. Existuje mnoho různých způsobů jak bloky a tahové elementy rozmístit. Následující návrhy konstrukčního řešení představují možnosti rozmístění a počtu bloků uvnitř dutiny zrcadla. Každý pár návrhů má vždy stejné schéma rozmístění, ale různý počet bloků. Všechny konstrukční návrhy se snaží o jednoduchou vyrobiteľnost, proto jsou spáry mezi bloky společně s mezerou na okraji dutiny stejně široké.



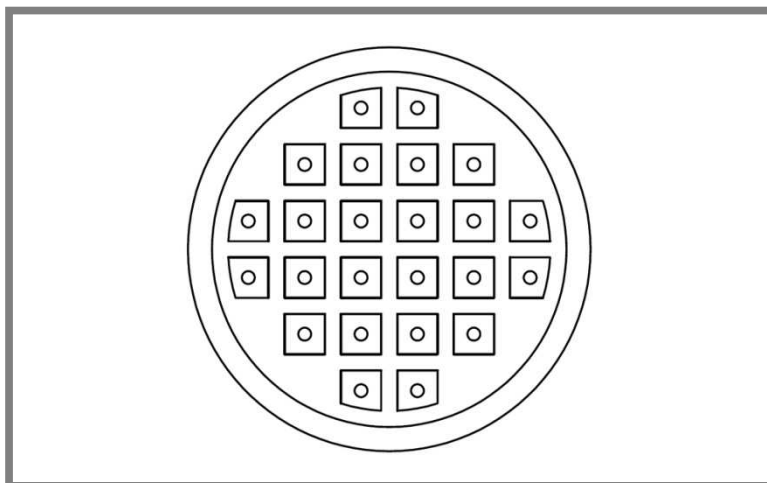
Obr. 10 Řez zrcadla s dutinou i bloky a vyznačenou odraznou plochou



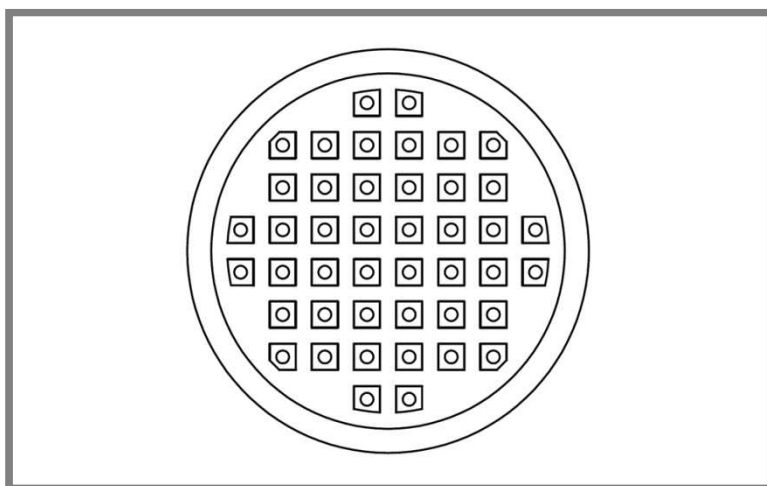
Obr. 11 Odrazná plocha polotovaru zrcadla

### 3.2.1 Varianta rozmístění bloků do mřížky se spárou ve středu

První konstrukční návrhy představují rozmístění bloků v dutině zrcadla do průsečíků kolmé mřížky, přičemž středem dutiny prochází spára mezi bloky. První návrh obsahuje 24 bloků s kolmou vzdáleností středů 7 mm a druhý 44 bloků, vzdálených 5,2 mm.



Obr. 12 Schéma první varianty rozmístění do mřížky s 24 bloky

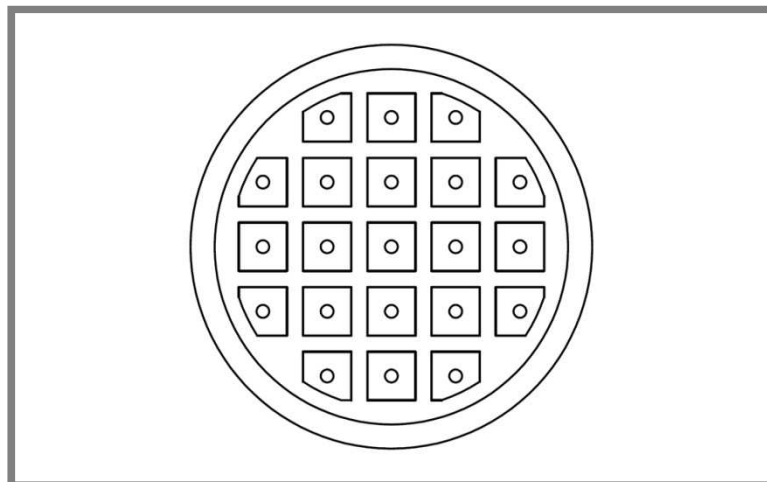


Obr. 13 Schéma první varianty rozmístění do mřížky s 44 bloky

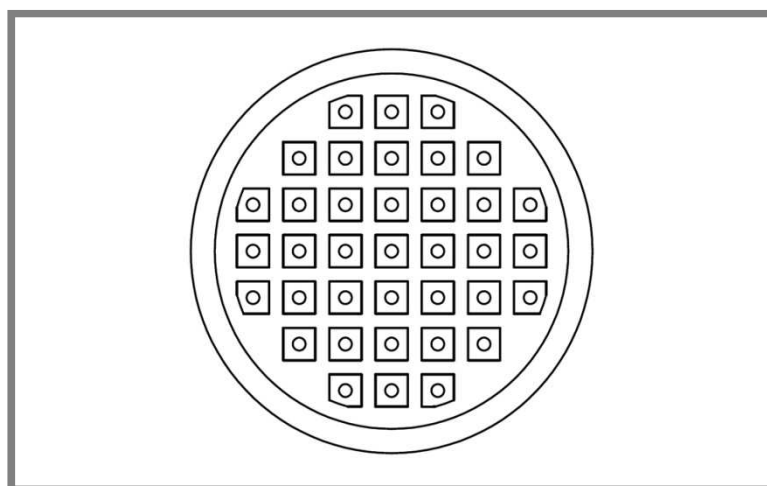
**3.2.2 Varianta rozmístění bloků do mřížky s blokem ve středu**3.2.2

---

Další možnost rozmístění je opět umístění bloků do průsečíků kolmé mřížky, ale nyní je ve středu dutiny blok. V tomto případě má první návrh 21 bloků a kolmá vzdálenost jejich středů je 8 mm a druhý 37 bloků, vzdálených od sebe 5,8 mm.



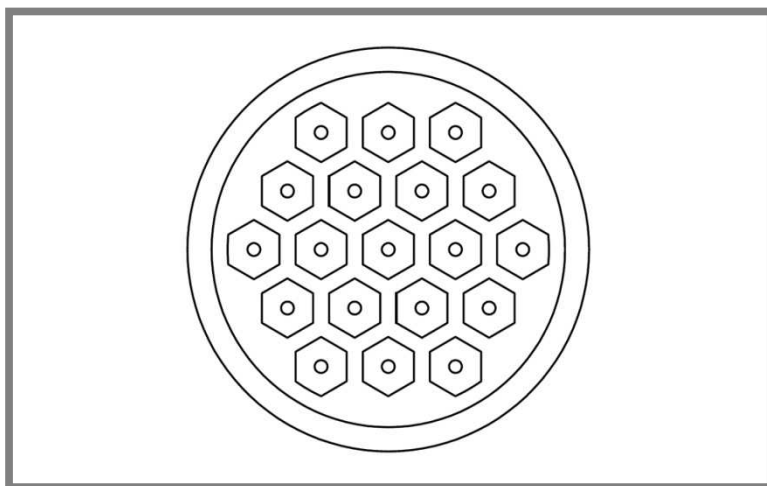
Obr. 14 Schéma druhé varianty rozmístění do mřížky s 21 bloky



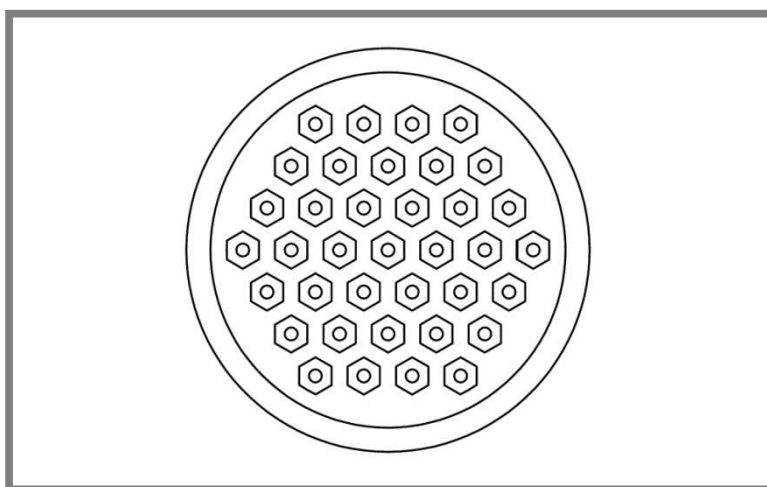
Obr. 15 Schéma druhé varianty rozmístění do mřížky s 37 bloky

### 3.2.3 Varianta rozmístění bloků do šestiúhelníků

Následný pár obrázků návrhu konstrukčního řešení zobrazuje rozmístění elementů do myšlených soustředných rovnostranných šestiúhelníků. První z řešení obsahuje 19 bloků tvaru šestihranu, pravidelně rozmístěných v dutině zrcadla, jejichž středy jsou od sebe vzdálené 8,4 mm. Druhé řešení má 37 menších šestihranných bloků, které jsou od sebe vzdálené 6 mm.



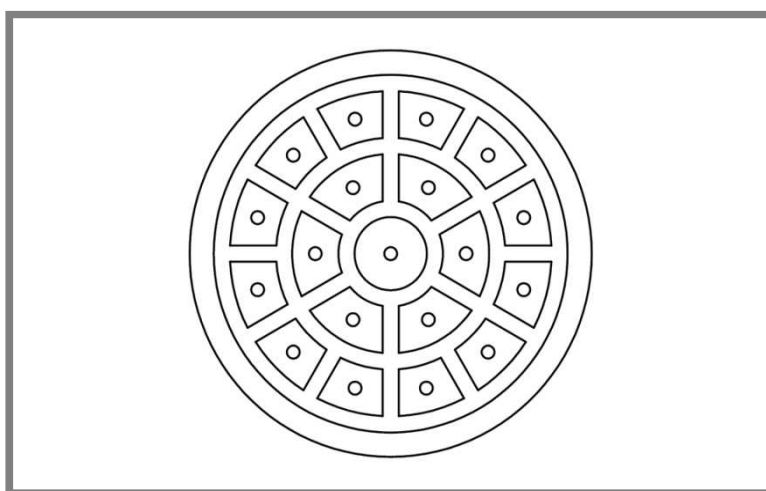
Obr. 16 Schéma rozmístění do šestiúhelníků s 19 bloky



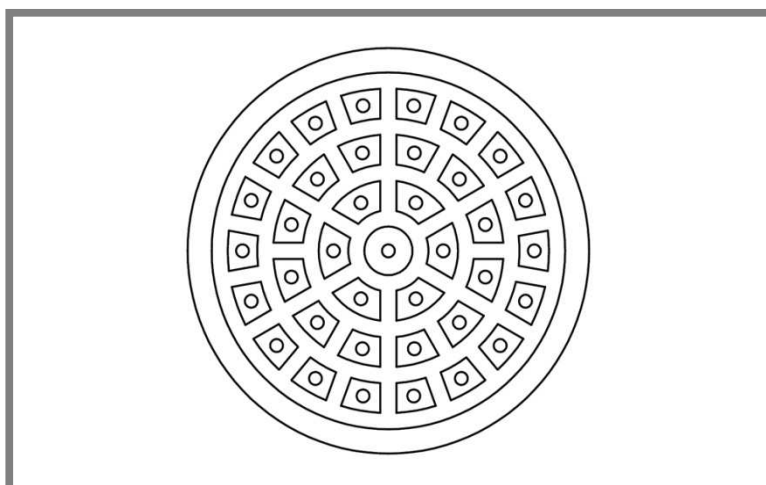
Obr. 17 Schéma rozmístění do šestiúhelníků s 37 bloky

### 3.2.4 Varianta rozmístění bloků do kruhů

Posledním navrhovaným řešením je pravidelné rozmístění bloků v kruzích, přičemž velikost bloků je přizpůsobena tak, aby plocha, kterou bloky v dutině vytínají byla přibližně stejná. V prvním návrhu se vyskytuje celkem 19 bloků, z toho 18 tvaru mezikruhové výseče a jeden tvaru kruhu, ležícího ve středu dutiny. Vzdálenost mezi bloky ve vnitřním mezikruží je 9,4 mm, stejně jako vzdálenost mezi středním blokem a těmito bloky. Vzdálenost mezi bloky vnitřního a vnějšího mezikruží je 8,4 mm a vzdálenost mezi bloky vnějšího mezikruží je 8,9 mm. Ve druhém řešení je 37 menších bloků, tvarově i rozmístěním analogických s prvním řešením. V tomto případě je vzdálenost mezi středním blokem a prvním mezikruží 6,8 mm, vzdálenost mezi bloky prvního a druhého mezikruží je 6,2 mm a vzdálenost mezi bloky druhého a třetího mezikruží je 5,8 mm. Vzdálenost bloků v prvním mezikruží je 6,8 mm, ve druhém 6,5 mm a ve třetím 6,3 mm.



Obr. 18 Schéma rozmístění do kruhů s 19 bloky



Obr. 19 Schéma rozmístění do kruhů s 37 bloky



---

### 3.3 Výběr optimální varianty řešení

Varianta řešení spočívajícího v rozmístění bloků do průsečíků kolmé mřížky, má hlavní nevýhodu v nerovnoměrném rozložení bloků po celé ploše zrcadla a tedy špatnou schopnost deformovat odraznou plochu ve všech jejích místech, především na okrajích. Varianta s šestiúhelníky řeší tuto nevýhodu o něco lépe a varianta s bloky rozmístěnými v mezikružích tento problém nemá vůbec.

Vzdálenosti mezi bloky v prvním a druhém případě je v kolmém a úhlopříčném směru rozdílná. Z toho důvodu by na povrchu zrcadla vznikla v každém směru od bloku jiná, tedy nepravidelná deformace, která je nežádoucí. Stejně by tomu tak bylo s bloky rozmístěnými do mezikružích. Bloky rozmístěné do šestiúhelníků, jsou mezi sebou stejně vzdálené a tedy nemají tendenci vytvářet nepravidelnou deformaci stěny zrcadla.

Všechna řešení, která obsahují větší počet bloků, mají nevýhodu v malé vzdálenosti mezi bloky a není tedy možné v tak malém prostoru jednoduše použít tahové mechanismy.

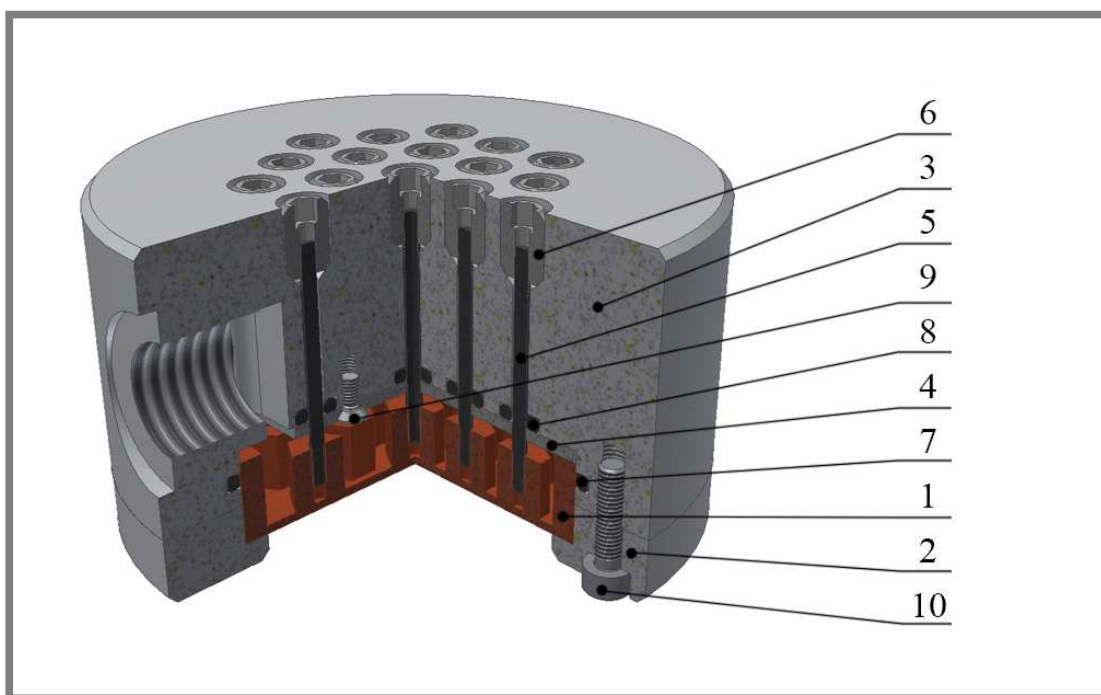
Řešení adaptivního zrcadla podobného variantě s bloky tvaru šestihranů, rozmístěnými do soustředných šestiúhelníků, bylo již mnohokrát úspěšně použito v zrcadlech optických teleskopů i v pokusech o podobné zrcadlo. Proto je z tohoto důvodu a také z důvodu pravidelné deformace, pro výsledné konstrukční řešení vybrán zmíněný návrh a to ve variantě s menším počtem bloků.

Jelikož se jedná o prototyp a také první návrh adaptivního zrcadla pro výkonové lasery, založeném na tomto principu deformace odrazné plochy, je nutné nejdříve ověřit fungování tohoto principu. Proto je pro výrobu prototypu zvoleno technicky nejjednodušší a finančně nejméně náročné řešení a to varianta tahových mechanismů fungujících na principu mechanických táhel.

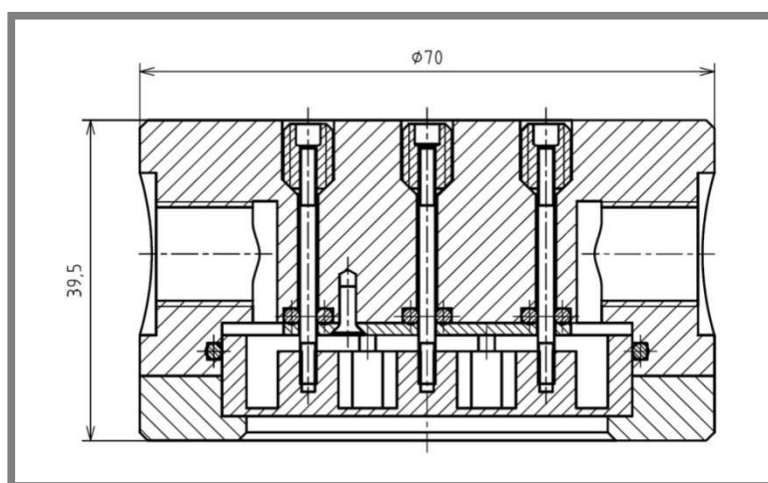
## 4 VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4

Zkonstruovaná sestava adaptivního zrcadla je složena z částí vyráběných a to ze samotného zrcadla (1), dvou přírub (2),(3), přitlačného plechu (4), devatenácti táhel (5) a devatenácti upravených šroubů (6). Dále pak z částí běžného sortimentu a to z jednoho velkého O-kroužku (7), devatenácti malých O-kroužků (8), třech šroubů M2 (9) a šesti šroubů M3 (10). Materiály vyskytující se v sestavě v největší míře jsou slitina mědi, duralová slitina, ocel a pryž. Celá sestava má průměr 70 mm, výšku 39,5 mm, hmotnost 440 g a obsahuje celkem 71 dílů.



Obr. 20 Řez modelem sestavy adaptivního zrcadla

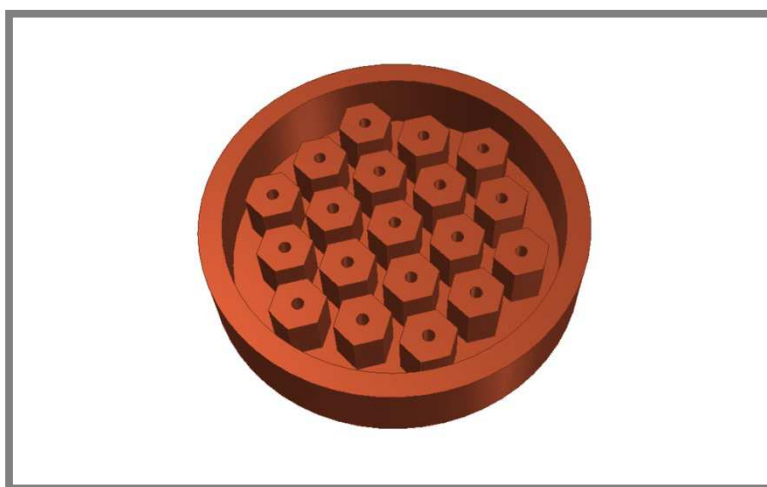


Obr. 21 Řez sestavou adaptivního zrcadla

#### 4.1 Zrcadlo

Nejdůležitější součástí celé sestavy adaptivního zrcadla je samotné deformovatelné zrcadlo. Toto zrcadlo je vyrobeno z polotovaru tuhého zrcadla, běžně používaného ve výkonových laserech. Materiál zrcadla je slitina mědi s 1% síry. Jeho průměr je 50 mm a výška 10 mm. Odrazná plocha je pokryta, již z výroby polotovaru, povlakem zlata. V horní neodrazné ploše je vyfrézovaná dutina. Stěna této dutiny má po obvodu šířku 3 mm a dno tloušťky 1 mm. V dutině se vyskytuje devatenáct vhodně rozmístěných bloků, které mají tvar pravidelného šestihranu a výšku 7 mm. Ve středu každého bloku je vytvořena díra hloubky 5 mm s metrickým závitem M2. Poloha bloků je zvolena tak, že jeden blok se nachází ve středu dutiny. Dalších šest bloků obklopuje prostřední blok a jsou umístěny v rozích myšleného rovnostranného šestiúhelníku. Zbýlých dvanáct bloků leží v rozích a středech stran myšleného rovnostranného šestiúhelníku, který se nachází kolem předešlých šesti bloků. Rozmístění a velikost bloků je přizpůsobeno šířce okraje mezi stěnou dutiny a bloky, a šířce mezery mezi bloky. Bloky jsou rozmístěny 2 mm od sebe, stejně jako 2 mm od okraje. Sjednocení šířky mezery má za účel zjednodušit výrobu dutiny.

Výroba zrcadla spočívala ve vyfrézování dutiny, tzn. snížení horní plochy, bez okrajů, o 2 mm a vytvoření mezer mezi bloky a stěnou dutiny. Následovalo vyvrtání děr do středů bloků a vytvoření závitů. V příloze práce se nachází výkres, určený pro CNC frézku, ve kterém jsou zakótované polohy jednotlivých děr v blocích. Při obrábění bylo třeba dbát na ochranu vrstvy povlaku, kterou je odrazná plocha opatřena.



Obr. 22 Pohled na dutinu zrcadla

## 4.2 Dolní příruba

Dolní příruba slouží společně s horní přírubou k těsnému zapouzdření zrcadla a zbylých součástí sestavy. Tento díl je vyrobený z duralové slitiny. Vnější průměr součásti je 70 mm a výška je 8 mm. Otvor, do kterého se vsune zrcadlo, má hloubku 5 mm a průměr 50 mm. Vnitřní otvor má průměr 44 mm. Po obvodu se na kružnici o průměru 60 mm nachází 6 pravidelně rozmístěných děr průměru 3,3 mm s odsazením pro šrouby s průměrem 6 mm a hloubkou 3 mm. Součást je vyrobena soustružením a následným vyvrtáním a zahloubením děr určených pro šrouby. Součást je opatřena povrchovou úpravou, černým eloxováním.



Obr. 23 Dolní příruba

### 4.3 Horní příruba

Geometricky i výrobou nejsložitější součást celé sestavy válcového tvaru, zvaná horní příruba, je vytvořena ze slitiny duralu a má vnější průměr 70 mm a výšku 31,5 mm. Hlavní funkcí tohoto dílu je přívod vzduchu do prostoru za zrcadlem a uchycení mechanismů určených k deformaci zrcadla. Součást obsahuje devatenáct otvorů pro táhla. Tyto otvory mají z vnitřní strany odsazení, o průměru 6 mm a hloubky 1,8 mm, pro umístění O-kroužků. Z vnější strany je pak každý otvor opatřen odsazením pro šrouby, které má průměr 6,3 mm a hloubku 9,1 mm. Dno otvorů má zkosení 45°, určené pro dosednutí šroubů. Na vnitřní straně jsou pak vhodně umístěny tři závitové díry M2 hloubky 6 mm, které slouží pro připevnění přítlačného plechu šrouby k přírubě. Příruba má po obvodu na dvou protějších místech umístěny díry pro přívod vzduchu. Tyto díry mají trubkový závit G1/4", do kterých se našroubuje armatura a jsou zakončené odražením průměru 20 mm určenému k lepšímu připevnění armatury. Na koncích těchto děr se nachází otvor oválného tvaru, který je určen pro přívod vzduchu do prostoru za zrcadlem. Příruba má po obvodu 6 děr velikosti M3 a hloubky 9 mm, jež slouží pro šrouby, které k sobě připevňují dolní a horní přírubu. Uvnitř příruby je také vytvořena drážka pro velký O-kroužek, který zajišťuje utěsnění mezery mezi zrcadlem a přírubou. Povrch je opět ošetřen černým eloxováním.

Způsob výroby horní příruby obnáší vysoustružení základního tvaru příruby, následné vyvrtání a zahloubení děr pro táhla, vyfrézování otvorů pro přívod vzduchu a také vyvrtání a závitování děr pro armatury a šrouby.



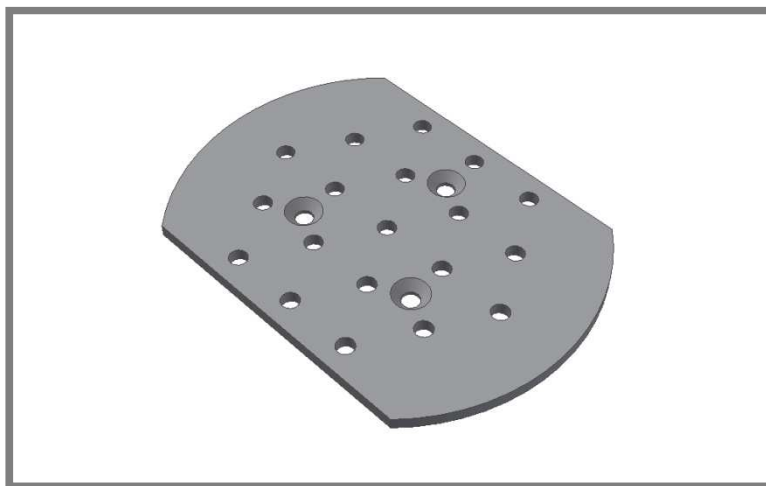
Obr. 24 Pohled na dutinu horní příruby

#### 4.4 Přítlačný plech

4.4

---

Plechová součást tloušťky 1,5 mm, jež je vyrobena ze slitiny duralu, bude zajišťovat přitlačení těsnících kroužků k táhlům a stěnám otvorů v horní přírubě. Plech má kruhovitý tvar o průměru 50 mm a je z obou stran seříznut na šířku 35 mm. Má 19 otvorů vytvořených pro táhla a 3 pro upevňovací šrouby. Všechny otvory mají průměr 2,2 mm. Otvory pro šrouby mají zkosenou hranu pro zápustnou hlavu šroubu. Plechová součást se vyrobila na CNC laseru podle souboru ve formátu DXF.



Obr. 25 Přítlačný plech

#### 4.5 Táhla

4.5

---

Tyto součásti, relativně jednoduchého tvaru o průměru 2 mm a délky 29 mm, jsou na obou koncích opatřeny závity M2, z jedné strany délky 5 mm a z druhé 7 mm. Táhla budou zajišťovat přenos tahové síly, vytvořené šrouby v horní přírubě, do stěny zrcadla. Jako polotovary součástí byly použity dráty, určené pro svařování metodou TIG. Tyto dráty bylo vhodné použít díky dostatečné pevnosti a dostupnosti. Materiál, ze kterého jsou dráty vyrobené, je legovaná austenitická ocel 1.4301 (X5CrNi 18-10). Pevnost tohoto materiálu je 520-720 MPa [20].

#### 4.6 Průchozí šrouby

4.6

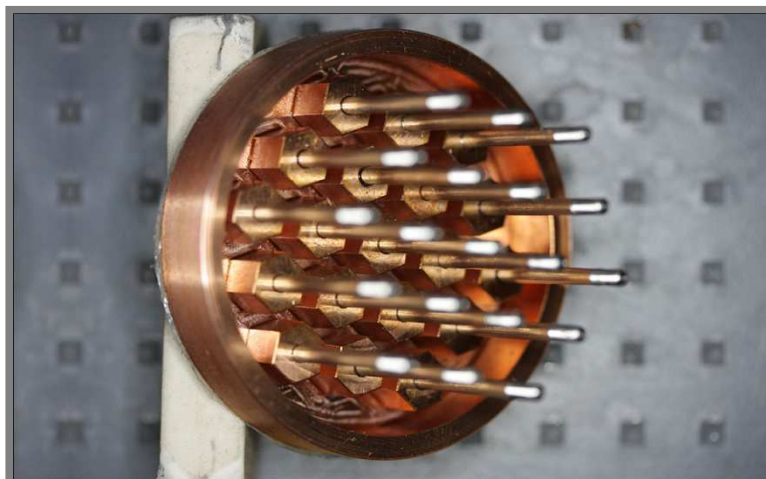
---

Jako polotovary těchto dílů je použit stavěcí šroub s vnitřním šestihranem a plochým koncem velikosti M6 a délky 8 mm (ISO 4026). V těchto šroubech je vytvořena průchozí díra se závitem M2 po celé délce díry. Použití šroubů jako polotvaru je především kvůli vnitřnímu šestihranu, který nelze jednoduše vyrobit, malým rozměrům a nízké ceně. Šrouby budou sloužit k vytváření tahové síly na táhlo a to pootočením v horní přírubě [21].

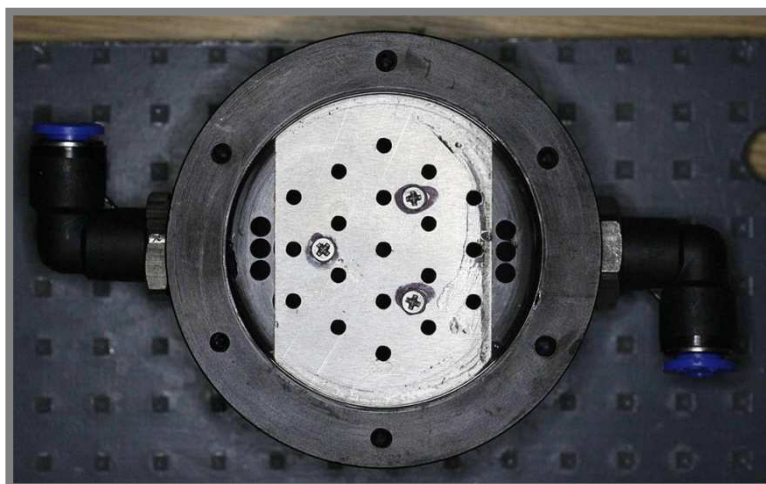
#### **4.7 Ostatní díly**

Mezi ostatní díly spadají prvky sestavy, které jsou dostupné v běžném sortimentu a proto je není nutné vyrábět nebo jakkoli upravovat. Mezi tyto díly patří devatenáct O-kroužků s vnitřním průměrem 1,78 mm a průměrem kroužku 1,78 mm, které mají za účel utěsnit prostor mezi táhly a horní přírubou před únikem vzduchu. Další součástí je opět O-kroužek s vnitřním průměrem 50 mm a průměrem kroužku 2 mm. Tento kroužek bude dbát na utěsnění spáry mezi horní přírubou a zrcadlem. Dalšími díly jsou šrouby a to šest šroubů velikosti M3 a délkou 10 mm s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (ISO 4762 - 12.9), které zajistí pevné spojení dolní a horní příruby. Dále pak tři šrouby M2, délky 5 mm se zápusťnou hlavou (ISO 2009 - 4.8), které budou přidržovat přitlačný plech na horní přírubě [21].

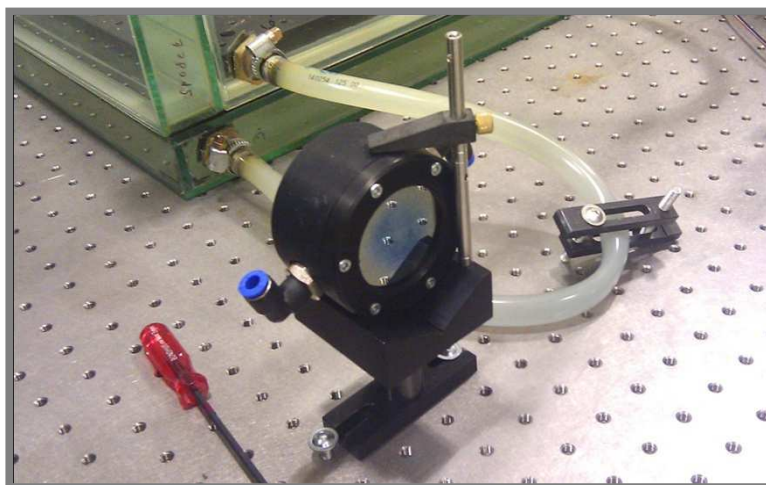




Obr. 26 Zrcadlo s připevněnými táhly



Obr. 27 Horní příruba s přitlačným plechem



Obr. 28 Adaptivní zrcadlo připevněné na optickém stole



## 5 MĚŘENÍ POVRCHU ZRCADLA 3D SKENEREM

Skenování povrchu zrcadla mělo za účel změřit velikost maximální deformace a zjistit tvar deformované odrazné plochy.

Měření probíhalo za pomoci skenovacího systému ATOS Triple Scan 8M. Tento systém využívá projekci strukturovaného světla ve formě vertikálních a horizontálních pruhů, které jsou fázově posunuty a mění svoji tloušťku. K digitalizaci dat dochází optickým systémem a jelikož byla skenovaná reflektivní plocha zrcadla, bylo nezbytné na tuto část nanést matný prášek, který zamezí odleskům do objektivu. Tloušťka vrstvy matného prášku musela být dostatečně tlustá k zakrytí a zmatnění povrchu, ale také musela v co nejmenší míře ovlivnit naměřené výsledky. Pro nanesení matné vrstvy byl zvolen křídový prášek ve spreji na bázi alkoholu, který sice vytváří silnější vrstvu, ale zato nepoškodí odraznou plochu zrcadla pokrytou povlakem. Křídový prášek lze jednoduše nanést i setřít, rychle schne a je také cenově výhodnější než titanový prášek. Měřená plocha adaptivního zrcadla byla před nanesením prášku očištěna a příruba kolem této plochy opatřena devíti referenčními body o průměru 0,8 mm. Pro polohování byl použit dvouosý rotační stůl. Nanesení prášku, nalepení referenčních bodů a zpracování výstupních dat z optického 3D skeneru, v softwaru GOM Inspect, provedl kvalifikovaný pracovník [22].

Pomocí tohoto měření se podařilo splnit stanovené cíle, tedy určit velikost maximální deformace i tvar stěny zrcadla.



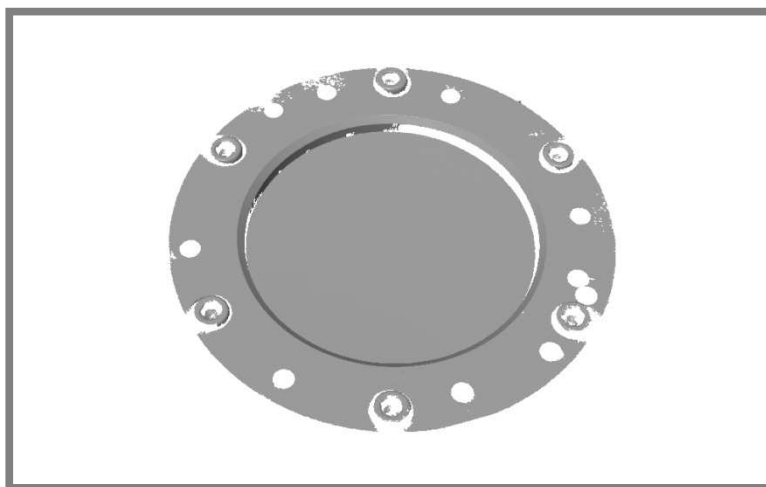
Obr. 29 Skenovací stanice

### 5.1 Podmínky měření

Během měření povrchu zrcadla byl do dutiny sestavy přiváděn vzduch pod tlakem 6 barů. Byly pořízeny čtyři snímky povrchu zrcadla, každý při jiném tvaru odrazné plochy. Měření se uskutečnilo za splněných podmínek, daných výrobcem skenovacího systému.

Jako první byl změřen výchozí stav zrcadla, který je možné vidět na obrázku č. 30. Měření proběhlo při nezatíženém povrchu zrcadla, do sestavy nebyl přiváděn vzduch a táhla nepůsobila silou na bloky zrcadla.

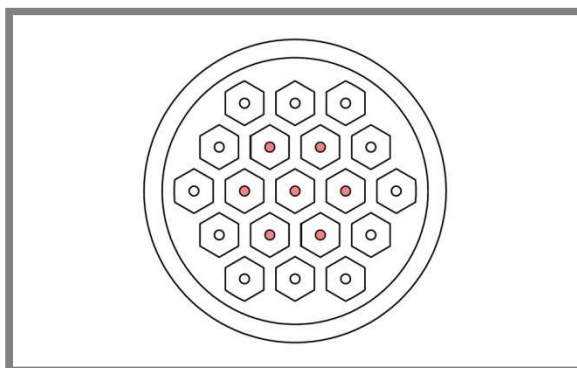
Tvar deformace odrazné plochy při zatíženém stavu, je měřený vzhledem k tomuto výchozímu nezatíženému stavu, který je možné vidět na obrázku níže.



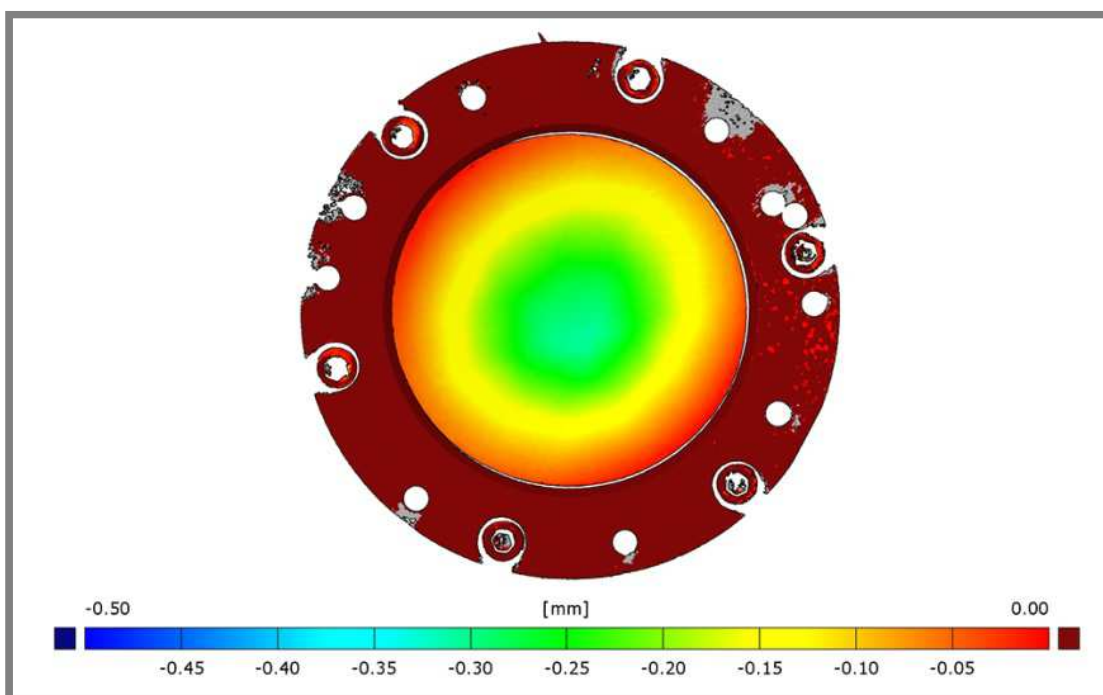
Obr. 30 Tvar nezatíženého povrchu zrcadla

## 5.2 Utažená středová táhla

Před prvním měřením deformace v zatíženém stavu, se mírně utáhla táhla ve středu, tzn. táhlo uprostřed a šest táhel kolem něj, tak jak jsou zvýrazněna na prvním obrázku. Odstín vyznačení na obrázku také naznačuje míru utažení táhel. Velikost odchylky od původního nezdeformovaného stavu je možné pozorovat na druhém obrázku. Legenda zobrazuje velikost odchylky v milimetrech. Maximální velikost deformace při utažení pouze středových táhel vznikla ve středu plochy a její velikost byla změřena 0,3081 mm.



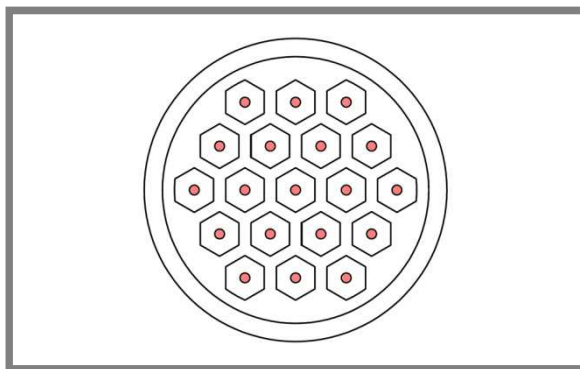
Obr. 31 Poloha utažených táhel při prvním měření



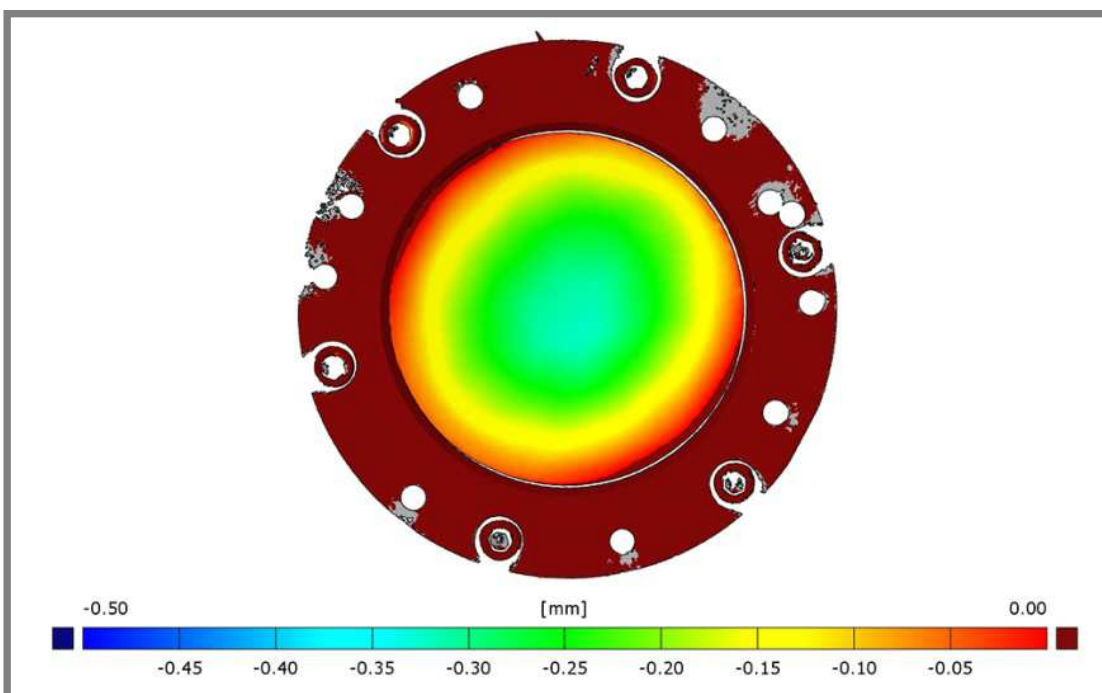
Obr. 32 Míra deformace zrcadla při utažení středových táhlech

### 5.3 Utažená středová i obvodová táhla

Druhé měření zatíženého stavu proběhlo za utažení i zbylých dvanácti obvodových táhel. Plocha zrcadla se při tomto zatížení zdeformovala o maximální hodnotu 0,3243 mm, v místě blízko středu. Výsledný tvar deformace je zobrazen na obrázku.



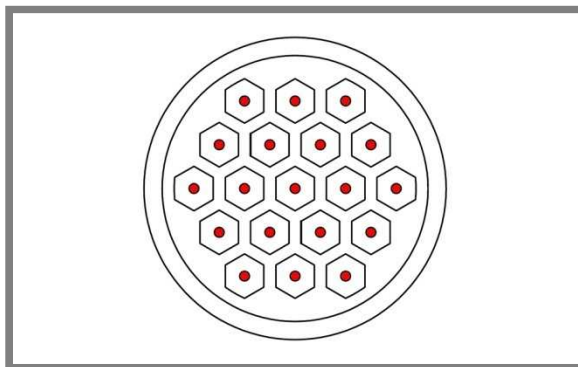
Obr. 33 Poloha utažených táhel při druhém měření



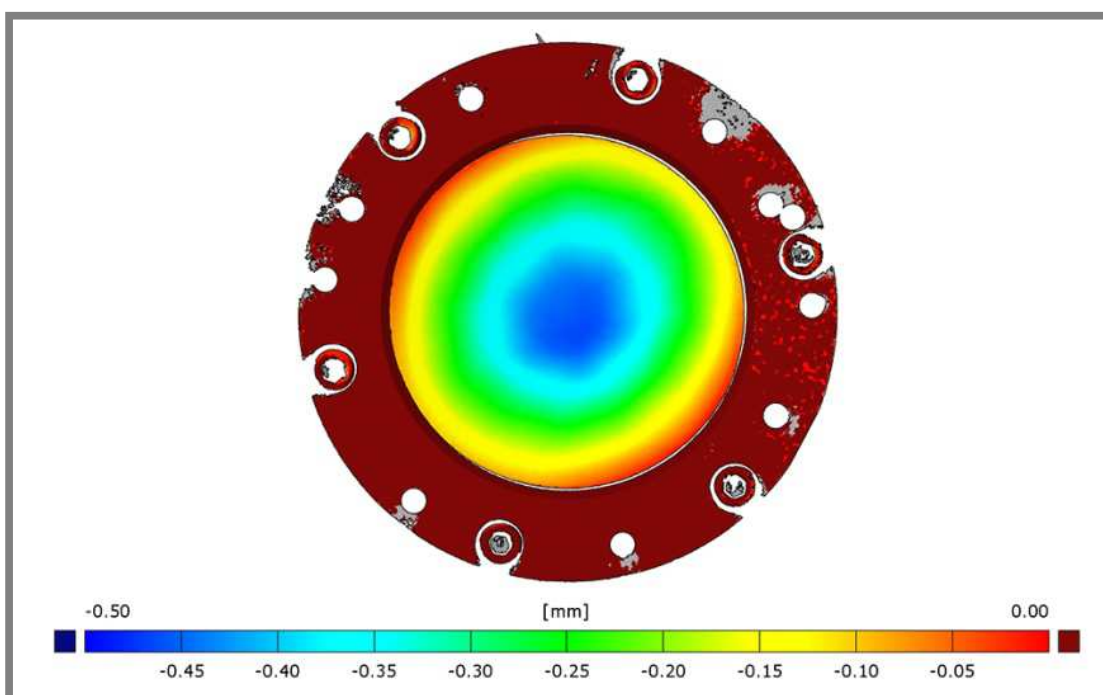
Obr. 34 Míra deformace zrcadla při utažených středových i obvodových táhlech

#### 5.4 Maximální vhodné utažení táhel

Před posledním skenováním povrchu, se všechna táhla utáhla na maximální možnou polohu. Při tomto utažení bohužel došlo ke zlomení jednoho táhla. Největší deformace, které bylo zrcadlo schopno vytvořit je 0,4641 mm, opět v blízkosti středu. Z obrázků změřených odchylek ploch je možné vidět, že tvary zdeformovaných ploch mají přibližně parabolický tvar, který je téměř symetrický.



Obr. 35 Poloha utažených táhel při třetím měření



Obr. 36 Míra deformace zrcadla při větším utažení všech táhel

## 5.5 Další metody měření deformace zrcadla

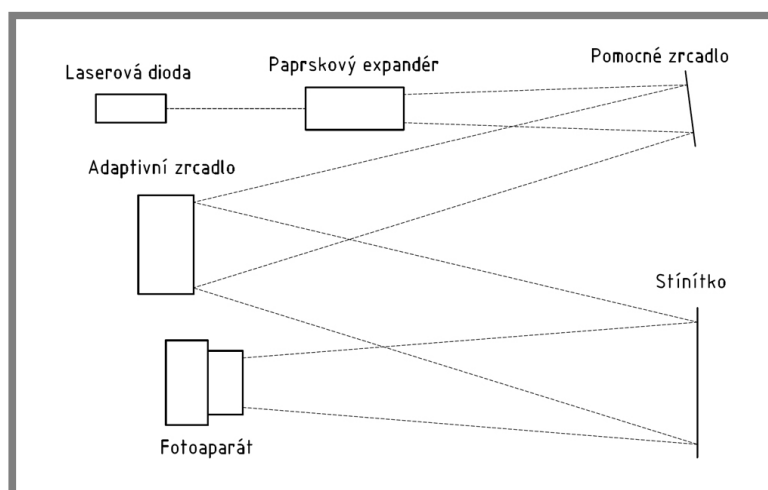
5.5

Deformace plochy zrcadla byla zjišťována také pomocí dvou dalších metod, které jsou zde popsány.

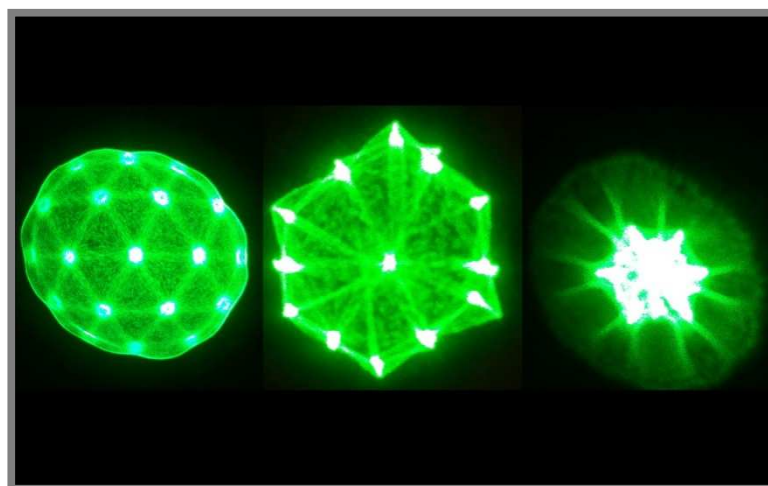
### 5.5.1 Zobrazení odraženého laserového svazku na stínítku

5.5.1

Tato metoda měla za cíl posoudit míru deformace odrazné plochy zrcadla. Princip této metody je zobrazen na obrázku č. 37. Laserová dioda s malým výkonem, vyzářila do paprskového expandéru zelené světlo s vlnovou délkou 532 nm. Tento expandér vytvořil z jednoduchého paprsku strukturovaný paprsek. Ten se poté z pomocného rovinného zrcadla odrazil na zrcadlo adaptivní a z něj na stínítko. Obrazce, které takto přetvořené paprsky na stínítku vytvořily, byly vyfoceny fotoaparátem a následně porovnávány, tak jak je možné vidět na obrázku č. 38.



Obr. 37 Princip zobrazení odraženého paprsku na stínítku

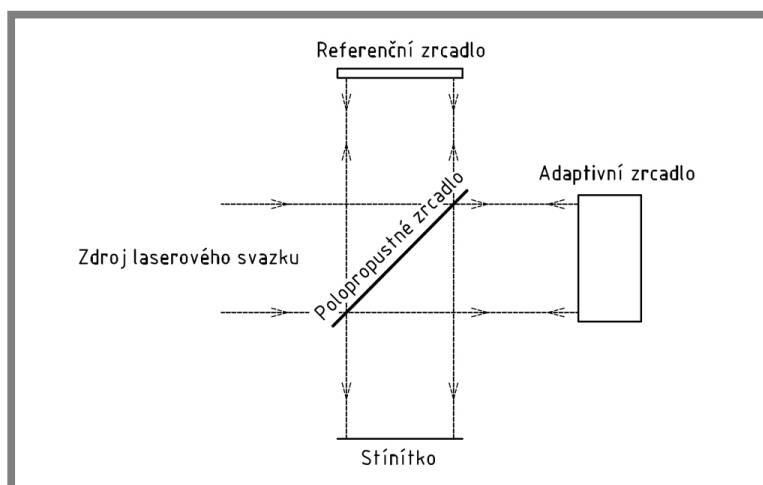


Obr. 38 Obrazce vzniklé na stínítku

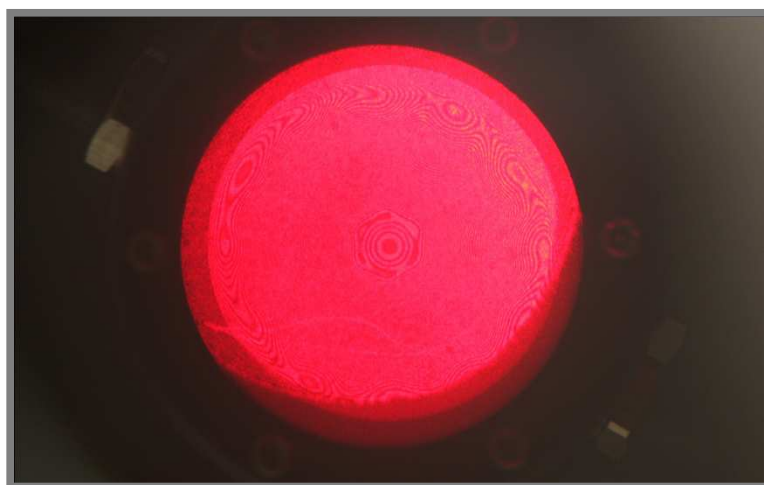
### 5.5.2 Měření Michelsonovým interferometrem

Druhá metoda, kterou byl zjišťován tvar odrazné plochy, využívá Michelsonův interferometr. Metoda je založena na interferenci světla a vzniku interferenčních maxim a minim. Touto metodou lze velmi přesně zjišťovat vzdálenosti a tedy i tvar povrchu. Princip metody spočívá v rozdělení laserového paprsku pomocí polopropustného zrcadla na dva paprsky, přičemž jeden z těchto paprsků se odrazí od referenčního zrcadla a druhý od měřeného povrchu. Po odrazení paprsky opět projdou skrz polopropustné zrcadlo a následně se spojí na stínítku, kde spolu interferují a tím vzniknou interferenční maxima a minima.

Měření probíhalo podle obrázku č. 39. Cílem bylo zjistit tvar a velikost deformace odrazné plochy zrcadla. Velikost deformace měřené plochy byla však natolik velká, že nebylo možné pomocí této metody zjistit její tvar. Vzdálenost jednotlivých maxim odpovídá vlnové délce použitého laserového světla a tedy 633 nm. Jelikož deformace zrcadla je v řádech desetin milimetrů, byly jednotlivé proužky velmi blízko u sebe a nebylo je tedy možné od sebe rozeznat. Obrazec, který vznikl při použití této metody je možné vidět na obrázku č. 40.



Obr. 39 Schéma Michelsonova interferometru



Obr. 40 Obrazec vzniklý při použití interferometru



## 6 DISKUZE

Navržený a použitý typ těsnění nebyl v prvních chvílích přívodu vzduchu schopný plně utěsnit prostor za zrcadlem, jelikož vzduch vháněný do tohoto prostoru unikal průchozími šrouby skrz závity uvnitř šroubů. Po mírném pootočení šroubů však došlo k vymezení vůlí a O-kroužky lépe dosedly na těsněné plochy a vzduch unikat přestal. Lepší utěsnění by se dalo vyřešit volbou vhodnějšího rozměru otvoru pro O-kroužky, čímž by dovedly lépe vyplnit celý otvor a utěsnit prostor mezi táhly a horní přírubou. Dalším možným řešením je výměna O-kroužků za pryžové těsnění, umístěné v celé ploše příruby, s těsnými otvory pro táhla.

Při realizaci byly zjednodušeny oba dva oválné otvory v horní přírubě, které slouží pro přívod vzduchu. Tyto oválné otvory byly nahrazeny třemi děrami vyvrtanými na krajích a uprostřed každého, původně navrženého otvoru. Tato změna je funkčně ekvivalentní s původním návrhem a nemá zásadní vliv na funkci otvoru.

Tlak vyvinutý v prostoru dutiny zrcadla nezpůsobil žádné deformace součástí obklopujících tento prostor.

Ke zlomení táhla, při větším utažení před posledním měřením 3D skenerem, došlo kvůli překročení pevnostního napětí. K tomuto meznímu stavu došlo vlivem velkého kombinovaného namáhání a to k namáhání tahem, ke kterému je táhlo určeno, ale také namáhání smykem a ohybem, způsobené vychýlením osy závitu v bloku zrcadla a osy díry v horní přírubě. Toto vychýlení bylo zapříčiněno relativně velkou deformací stěny a tudíž nakloněním bloku, tečného k ploše zrcadla.

Ačkoliv byla odrazná plocha při prvním měření nezatížena, byla i tak mírně deformovaná. Tuto deformaci má na svědomí plastická deformace vniklá během předchozích zatěžování zrcadla, relaxace materiálu v místě odrazné plochy a deformace, která vznikla během obrábění. Jelikož jsou další, deformované stavy odrazné plochy porovnávány se stavem prvním „nedeformovaným“, vzniká tak chyba v měření velikosti deformace odrazné plochy vzhledem k absolutně nedeformovanému stavu, tedy rovině.

Použití konstrukčních návrhů, ve kterých jsou bloky na zrcadle blízko u sebe, by bylo možné v případě, kdyby se tahové mechanismy uložily do více pater nad sebe a bylo by tak možné tvar odrazné plochy deformovat na více místech. Toto řešení by ovšem mělo vliv na kompaktnost celé sestavy.

Deformace je omezena obvodovou stěnou zrcadla, na jejíž spodní plochu musí deformovaná plocha tečně navazovat. Z toho důvodu je možné měnit tvar plochy do přibližně parabolického tvaru.

Tloušťka dna zrcadla má velký vliv na míru deformovatelnosti a výslednou geometrii odrazné plochy.

Jelikož tvar odrazné plochy zrcadla se nastaví vždy pouze před určitou laserovou aplikací a během ní se již nezmění, nebude plnit zrcadlo funkci adaptivní optiky, ale podle terminologie funkci optiky aktivní.



---

## 7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navržení a následná konstrukce sestavy adaptivního zrcadla, schopného měnit tvar své odrazné plochy do zvoleného tvaru. Deformace tvaru měla být v řádech desetin milimetrů a prováděna sadou tahových elementů, rozmístěných na zadní straně zrcadla a tlakem vzduchu.

Podařilo se vytvořit řadu konstrukčních návrhů, ze kterých byla vybrána optimální varianta, podle které se realizovala funkční sestava adaptivního zrcadla. Touto sestavou je možné záměrně měnit tvar odrazné plochy zrcadla do obecného tvaru a to pomocí tlaku vyvinutého na zadní stranu zrcadla a devatenácti tahových elementů, tvořených upravenými šrouby a táhly. Do prostoru za zrcadlem je možné pod tlakem 6 barů přivádět vzduch, který zajišťuje deformaci a chladí odraznou plochu zrcadla. V rámci práce proběhlo měření tvaru odrazné plochy zrcadla 3D skenerem, na základě kterého lze konstatovat, že deformace plochy poblíž středu zrcadla je téměř 0,5 mm, čímž je splněn předpoklad velikosti deformace a zrcadlo je pro svoji funkci tedy zcela dostačující. Změření povrchu zrcadla také potvrdilo splnění všech cílů práce. Model sestavy adaptivního zrcadla byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a výkresová dokumentace v programu AutoCAD.

Navazující práce by se mohla zabývat řešením deformace plochy adaptivního zrcadla, pomocí sady motorických aktuátorů, které je možné ovládat elektronicky a proto by se dalo rychleji a přesněji měnit tvar odrazné plochy. Také by bylo vhodné, zabývat se vlivem rozložení bloků a tloušťky stěny na deformaci povrchu.

Vyrobený prototyp adaptivního zrcadla bude dále využíván k výzkumu změny vlastností odraženého laserového svazku.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Vienaľa Košice, 2000. 270s. ISBN: 80-7099-430-3
- [2] ŠULC, Jan: *Průmyslové aplikace laserových systémů* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
- [3] ŠULC, Jan: *Lasery a jejich aplikace* [online]. [cit. 2014-5-18]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [4] *Optika a optoelektronika* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/optika-optoelektronika?prezentace>
- [5] *Adaptivní optika* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.toptec.eu/cz/specializace-11/adaptivni-optika-a-difraktivni-opticke-prvky-systemy-a-optoelektronika>
- [6] *Řízení největšího dalekohledu na světě pomocí softwaru NI LabVIEW s podporou vícejádrových procesorů* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13731>
- [7] *Adaptive Optics* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/adaptive\\_optics/](https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/adaptive_optics/)
- [8] *Active Optics* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/active\\_optics/](https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/active_optics/)
- [9] VIDLÁKOVÁ Zuzana: *Realizace adaptivní optiky pro ferokapalinová deformovatelná zrcadla* [online] 27.9.2008 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://observatory.cz/news/realizace-adaptivni-optiky-pro-ferokapalinova-deformovatelnazrcadla.html>
- [10] KUDRYASHOV, Alexis V. a Vadim V. SAMARKIN. *Control of high power CO2 laser beam by adaptive optical elements* [online]. 1995 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003040189500218W>
- [11] PLANCHON, Thomas A., Pascal MERCÈRE, Gilles CHÉRIAUX a Jean-Paul CHAMBARET. *Off-axis aberration compensation of focusing with spherical mirrors using deformable mirrors* [online]. 2003 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401802023003>
- [12] PLANCHON, Thomas A., Jean-Phillipe ROUSSEAU, Frédéric BURGUY, Gilles CHÉRIAUX a Jean-Paul CHAMBARET. *Adaptive wavefront correction on a 100-TW/10-Hz chirped pulse amplification laser and effect of residual wavefront on beam propagation* [online]. 2005 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401805003433>
- [13] YANG, Ping, Yuan LIU, Wei YANG, Ming-Wu AO, Shi-Jie HU, Bing XU a Wen-Han JIANG. *Adaptive mode optimization of a continuous-wave solid-state laser using an intracavity piezoelectric deformable mirror* [online]. 2007 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401807006384>
- [14] LEFAUDEUX, Nicolas, Xavier LEVECQ, Guillaume DOVILLAIRE, Jérôme BALLESTA, Emeric LAVERGNE, Paul SAUVAGEOT a Lionnel ESCOLANO. *Development of a new technology of deformable mirror for ultra intense laser applications* [online]. 2011 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210028974>

- [15] VDOVIN, G., O. SOLOVIEV, M. LOKTEV a V. PATLAN. *OKO Guide to Adaptive Optics*. Netherlands: Flexible Optical BV, 2013. Fourth edition.
- [16] *Mini cylinder, ISO 6432, Series MNI* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.rexrothpneumatics.com/pneumatics-catalog/Vornavigation/Vornavi.cfm?Language=EN&Variant=internet&VHist=g53567,g94167,g95072,g4584&PageID=p8738>
- [17] *INTERTEC COMPONENTS ITS-LZ-1642Z-24-Elektromagnet: Tažný; Unap:24VDC; Výkon:5,5W; Síla 1,1 kg; 130°C* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/em-cs1642z-24/elektromagnety/intertec-components/its-lz-1642z-24/#>
- [18] *Compact motorized Actuators* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://www.newport.com/TRA-Series-Compact-Motorized-Actuators/823081/1033/info.aspx#tab\\_Specifications](http://www.newport.com/TRA-Series-Compact-Motorized-Actuators/823081/1033/info.aspx#tab_Specifications)
- [19] *Picomotor Actuator, 1 in. Travel, 30 nm Resolution, 9.5 mm Shank* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://search.newport.com/?q=\\*&x2=sku&q2=8302](http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=8302)
- [20] *Nerezová ocel 1.4301* [online] [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [21] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011, xiv, 927 s. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [22] DOKOUPIL, Filip. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE. Vedoucí práce Ing. DAVID PALOUŠEK, Ph.D.

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

9

<b>Obr. 1</b> Princip adaptivního zrcadla [14]	15
<b>Obr. 2</b> Schéma MMDM zrcadla [15]	16
<b>Obr. 3</b> Schéma PDM zrcadla [15]	17
<b>Obr. 4</b> Princip deformace stěny zrcadla	19
<b>Obr. 5</b> Princip tahového mechanismu	20
<b>Obr. 6</b> Pneumatický válec firmy Rexroth Bosch Group [16]	21
<b>Obr. 7</b> Tažný elektromagnet firmy Intertec Components [17]	21
<b>Obr. 8</b> Motorizovaný aktuátor firmy Newport [18]	22
<b>Obr. 9</b> Lineární piezoaktuátor firmy Newport [19]	22
<b>Obr. 10</b> Řez zrcadla s dutinou i bloky a vyznačenou odraznou plochou	23
<b>Obr. 11</b> Odrazná plocha polotovaru zrcadla	23
<b>Obr. 12</b> Schéma první varianty rozmístění do mřížky s 24 bloky	24
<b>Obr. 13</b> Schéma první varianty rozmístění do mřížky s 44 bloky	24
<b>Obr. 14</b> Schéma druhé varianty rozmístění do mřížky s 21 bloky	25
<b>Obr. 15</b> Schéma druhé varianty rozmístění do mřížky s 37 bloky	25
<b>Obr. 16</b> Schéma rozmístění do šestiúhelníků s 19 bloky	26
<b>Obr. 17</b> Schéma rozmístění do šestiúhelníků s 37 bloky	26
<b>Obr. 18</b> Schéma rozmístění do kruhů s 19 bloky	27
<b>Obr. 19</b> Schéma rozmístění do kruhů s 37 bloky	27
<b>Obr. 20</b> Řez modelem sestavy adaptivního zrcadla	29
<b>Obr. 21</b> Řez sestavou adaptivního zrcadla	29
<b>Obr. 22</b> Pohled na dutinu zrcadla	30
<b>Obr. 23</b> Dolní příruba	31
<b>Obr. 24</b> Pohled na dutinu horní příruby	32
<b>Obr. 25</b> Přítlačný plech	33
<b>Obr. 26</b> Zrcadlo s připevněnými táhly	35
<b>Obr. 27</b> Horní příruba s přítlačným plechem	35
<b>Obr. 28</b> Adaptivní zrcadlo připevněné na optickém stole	35
<b>Obr. 29</b> Skenovací stanice	36
<b>Obr. 30</b> Tvar nezatíženého povrchu zrcadla	37
<b>Obr. 31</b> Poloha utažených táhel při prvním měření	38
<b>Obr. 32</b> Míra deformace zrcadla při utažených středových táhlech	38
<b>Obr. 33</b> Poloha utažených táhel při druhém měření	39
<b>Obr. 34</b> Míra deformace zrcadla při utažených středových i obvodových táhlech	39
<b>Obr. 35</b> Poloha utažených táhel při třetím měření	40
<b>Obr. 36</b> Míra deformace zrcadla při větším utažení všech táhel	40
<b>Obr. 37</b> Princip zobrazení odraženého paprsku na stínítku	41
<b>Obr. 38</b> Obrazce vzniklé na stínítku	41
<b>Obr. 39</b> Schéma Michelsonova interferometru	42
<b>Obr. 40</b> Obrazec vzniklý při použití interferometru	42

---

## 10 SEZNAM PŘÍLOH

---

### 10.1 Výkresová dokumentace

Název	Číslo výkresu
Adaptivní zrcadlo	AdaMir-002-0
Zrcadlo	AdaMir-002-1
Dolní příruba	AdaMir-002-2
Horní příruba	AdaMir-002-3
Přítlačný plech	AdaMir-002-4
Šroub	AdaMir-002-5
Táhlo	AdaMir-002-6

